

Алмаз электронного качества. Инновации. Инвестиции. Креативные проекты

В. Лучинин, д. т. н.¹, А. Колядин, к. т. н.²,
Ю. Ягудаев, к. э. н.³, С. Ильин, к. т. н.⁴

УДК 621.37 | ВАК 2.2.2

Представлено обобщенное комплексное рассмотрение синтетического алмаза электронного качества как материала с рекордными характеристиками для формирования инновационной отечественной технологии электронной компонентной базы на основе синтетического алмаза. Представлены комплексный проект «Создание серийного производства по технологии и на установках с оснасткой собственной разработки монокристаллических и поликристаллических пластин и эпитаксиальных структур синтетического алмаза методом газофазного осаждения» и креативные проекты алмазного микроприборостроения «Алмазный интеллектуальный скальпель» и «Алмазная интеллектуальная линза».

АЛМАЗ В СОВРЕМЕННОЙ ИНЖЕНЕРИИ. ОТ БРИЛЛИАНТОВ К ИНЖЕНЕРНОЙ ИНДУСТРИИ. СВОЙСТВА АЛМАЗА (ОПТИКА, ЭЛЕКТРОНИКА)

Наиболее яркий представитель «углеродного сообщества» – алмаз^{*}, углеродная природа которого была разгадана лишь в конце XVIII века, – остается уникальным дорогостоящим материалом, востребованным много веков в ювелирной, а последнее столетие и в инженерной среде. Наиболее широко алмаз известен как драгоценный камень – бриллиант^{**} и уникальный абразив.

Синтетический алмаз – рукотворный аналог природного минерала – занял устойчивые позиции на алмазном рынке. Наряду с ювелирным и абразивным алмазом значительный интерес вызывают получение и применение крупных синтетических монокристаллов высокого структурного совершенства и чистоты, а также микро- и наноразмерных управляемо легированных слоев алмаза для решения экстремальных инженерно-технических задач.

В условиях известных ограничений в поставках на российский рынок критически важных инновационных материалов и технологий, формирование высокоинтеллектуальных отечественных технологических ниш для обеспечения независимости, конкурентоспособности

и безопасности государства является безусловным приоритетом.

В отличие от других технологических вызовов, российская материаловедческая база обеспечила в настоящее время возможность формирования полностью отечественного инновационного технологического маршрута производства алмазной электроники с ранее недостижимыми энерго-частотными характеристиками, температурными и радиационными условиями эксплуатации. Это стало возможным благодаря постановке в России технологии выращивания крупных синтетических монокристаллов алмаза и разработке процессов получения легированных эпитаксиальных алмазных слоев, в том числе нанослоевых композиций. Успешная реализация на российской материаловедческой базе компонентов алмазной электроники позволяет констатировать формирование отечественного инновационного маршрута, который может рассматриваться как прорыв в наукоемком критическом направлении, определяющем независимость и безопасность государства.

Целью данной статьи является представление результатов формирования инновационной отечественной технологии электронной компонентной базы на основе уникального по своим электрофизическим, теплофизическим, оптическим и механическим свойствам материала – алмаза (рис. 1), обеспечивающего создание микро- и нанотехники нового поколения с ранее недостижимыми функциональными возможностями, режимами и условиями эксплуатации.

Фактически данную статью следует рассматривать как введение в технологический форсайт для построения

¹ ООО «ЦТМ-Карабаново», генеральный директор.

² ООО «НПК «Алмаз-Карабаново», генеральный директор.

³ ООО «Алмазная долина», генеральный директор.

⁴ ООО «ЦТМ-Карабаново», заместитель генерального директора.

^{*} От греч. *adamas* – несокрушимый.

^{**} От фр. *brilliant* – блестящий.

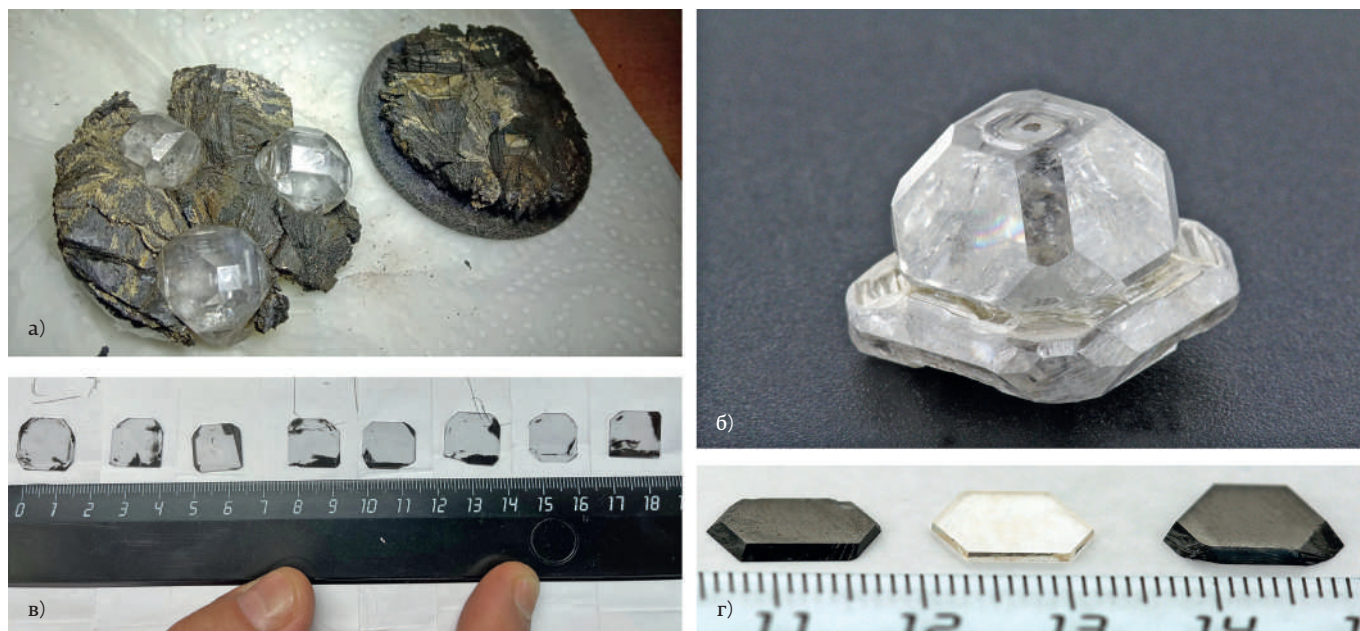


Рис. 1. Монокристаллы алмаза, выращенные НРНТ^{*}-методом: а – как растут крупные алмазы; б – монокристаллический алмаз 60 карат; в – полуфабрикаты крупных пластин; г – односекторные пластины <111> из 60-каратного алмаза (фотографии представлены ООО «Нью Даймонд Технолджи»)

дорожной карты проекта по формированию полностью независимой отечественной алмазной индустрии на основе алмаза электронного качества, которая может рассматриваться как российский вызов в достижении превосходства в высокоинтеллектуальной наукоемкой сфере с длительным горизонтом конкурентоспособной экономически эффективной реализации.

АЛМАЗ – МАТЕРИАЛ С РЕКОРДНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Обладая совокупностью уникальных электрофизических, теплофизических, оптических и механических свойств (рис. 2), алмаз [1] становится научно-индустриальным конструкторско-технологическим приоритетом при создании техники нового поколения с ранее недостижимыми функциональными возможностями, режимами и условиями эксплуатации.

Оптические параметры существенны при характеристике качества алмаза, включая «блеск» и разноцветную «игру» ограненных монокристаллов, и вносят решающий вклад в стоимость ювелирных изделий. Показатель преломления алмаза варьируется от 2,417 до 2,421; угловая дисперсия составляет около 0,06; отражательная

способность – 0,172. Цвет алмаза – одна из важнейших ювелирных характеристик – определяется его легированием и структурным совершенством. Известны следующие окраски алмаза: бесцветный, желто-коричневый, коричневый, черный, серый, синий, зеленый, красный, розовый, голубой и очень редко – сиреневый.

Существует классификация, разделяющая алмазы на типы в зависимости от содержания базовых примесей (азота и бора) и их распределения в кристалле, что определяет оптическую прозрачность в широком диапазоне от жесткого ультрафиолета до глубокого инфракрасного диапазона длин волн. Основной примесью в алмазе является азот (тип I – содержание азота до 0,2%, тип II – не более $10^{-3}\%$). Несмотря на возможность насыщения азотом до уровня 10^{18} см⁻³, природный алмаз остается диэлектриком, сопротивление которого может варьироваться в диапазоне от 10^{13} до 10^{16} Ом·см. Это связано с тем, что энергетическая глубина залегания донора (азота) очень велика – 1,7 эВ, что ограничивает концентрацию носителей заряда при комнатной температуре.

Перспективы формирования на основе алмаза полупроводниковых приборов и их конкурентоспособность по ряду энергетических и частотных параметров определяются возможностью получения легированного материала *n*- и *p*-типов проводимости. Легирование изменяет и цветовую гамму ювелирного алмаза. Традиционные для полупроводниковой технологии процессы диффузии непригодны из-за возможности протекания фазового перехода

* НРНТ (high pressure, high temperature) – кристаллизация алмаза из расплава углерода при высоких температуре и давлении в присутствии металлических катализаторов.

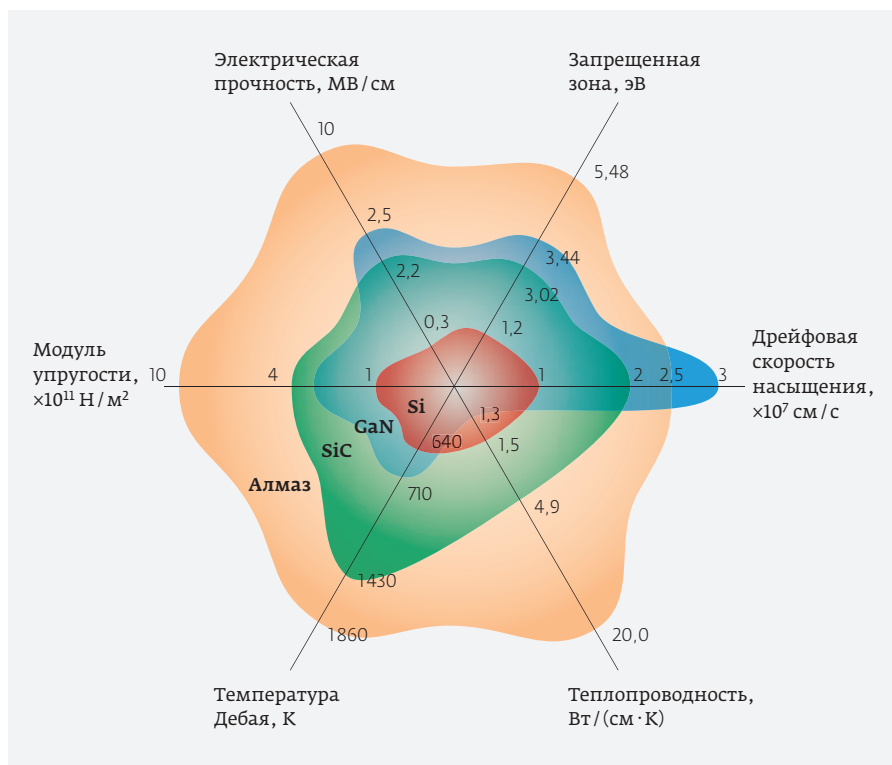


Рис. 2. Сопоставительный анализ материалов для решения экстремальных инженерно-технических задач

Так называемая технология термического формирования поверхности алмаза – модификация методом гидрирования, то есть термической или плазменной обработкой в водороде, – позволяет формировать дырочный проводящий канал толщиной до 10 нм с поверхностной плотностью заряда до 10^{13} см⁻² и сверхмалой энергией активации носителей (23 мэВ). Подвижность носителей заряда составляет 50...150 см²/В·с. В отношении применения фосфора в качестве донора следует отметить, что его можно внедрить в алмаз, но, как и акцептор бор, он является глубоким, и при обычных температурах этот источник электронов крайне ограничен.

Для квантовых информационных фотонных систем на основе алмаза важны так называемые центры окраски: азот-вакансия (NV) и кремний-вакансия (SiV). Очевидно, что представляет интерес легирование алмаза и другими примесями из IV группы периодической системы, например германием.

Оценивая свойства алмаза как материала для экстремальных условий и режимов эксплуатации, следует обратиться к общепринятым критериям (табл. 1) [2], характеризующим энергочастотные, коммутационные и теплодиссипативные возможности материала при создании высокочастотной и силовой электронной компонентной базы.

Перспективы абсолютного лидерства алмаза в экстремальной электронике определяют следующие его рекордные параметры:

- критическая напряженность электрического поля: $E_c = 10$ МВ/см;
- теплопроводность: $\lambda = 20$ Вт / см·К;
- ширина запрещенной зоны: $\Delta E = 5,45$ эВ;
- температура Дебая: $TD = 1860$ К;
- скорость распространения звука: $us = 10$ км/с.

Ряд важнейших электрофизических параметров, определяющих быстродействие прибора, в том числе V_s – скорость насыщения при дрейфе носителей в электрическом поле для электронов ($1,610^7$ см/с) и дырок ($1,110^7$ см/с), а также подвижность носителей заряда в нелегированном материале ($\mu_n = 4500$ см²/В·с, $\mu_p = 3800$ см²/В·с), находятся на уровне аналогичных параметров полупроводниковых материалов, используемых при создании высокочастотных приборов. Однако традиционные материалы – арсенид и нитрид галлия – значительно проигрывают алмазу

алмаза в графит, поскольку диффузионное введение примесей требует высоких температур и значительных длительностей процессов. Поэтому применяются легирование в процессе роста кристаллов, эпитаксия, ионная имплантация или термирование поверхности.

Базовый набор легирующих примесей для алмаза ограничен бором (0,37 эВ) в качестве акцептора, фосфором (0,58 эВ) и азотом (1,7 эВ) – в качестве доноров. При комнатной температуре данные глубокие примеси имеют достаточно низкую степень ионизации, что определяет ограничение количества свободных носителей заряда. Единственно возможный технологический способ увеличить их количество – создание сильнолегированного материала, что обеспечивает уменьшение энергетического зазора между зоной залегания примеси и потолком валентной зоны (материал p-типа) или дном зоны проводимости (материал n-типа). Если для типичного уровня легирования бором (менее 10^{17} см⁻³) энергия активации составляет 370 мэВ (степень ионизации 0,2%), то при концентрации примеси 10^{20} см⁻³ энергия активации имеет фактически нулевое значение, но при этом катастрофически падает подвижность носителей заряда. Резкое снижение подвижности дырок с 3800 см²/В·с ($N_A \approx 10^{15}$ см⁻³) до 100 см²/В·с происходит уже при концентрации примеси более 10^{19} см⁻³.

Таблица 1. Критерии оценки применимости материала в экстремальной электронике

Критерий	Базовое выражение	Интерпретация
Джонсона	$\sim (E_c \cdot V_s)^2$	Доминирует при оценке работы прибора на высоких частотах, учитывает эффективность (достижимая скорость) выделения мощности в полупроводнике
Кейса	$\sim \lambda \cdot V_s$	Учитывает тепловые ограничения при переключении – эффективность теплоотвода, определяемая способностью полупроводника к диссипации тепловой энергии
Балига	$\sim \epsilon \cdot \mu \cdot E_c^3$	Доминирует при оценке работы в мощных силовых низкочастотных приборах, обеспечивая сравнение материалов по резистивным потерям

Таблица 2. Использование рекордных характеристик алмаза

Приоритетные (рекордные) свойства алмаза	Направления. Области применения					
	СВЧ-электроника	Силовая электроника	Фото-ника	Микросистемная техника	Информационные технологии	Механо-обработка
Механическая твердость 10 000 кг / мм ² (по Виккерсу) *	-	-	-	•	-	•
Модуль упругости 10 ¹² Н/м ²	-	-	-	•	-	•
Коэффициент трения -0,02	-	-	-	•	-	•
Теплопроводность 2 103 Вт / м · К*	•	•	•	•	•	•
Коэффициент линейного расширения 10 ⁻⁶ К*	•	•	•	•	•	•
Скорость распространения звука 18,2 км / с*	•	-	-	•	-	-
Показатель преломления 2,4	-	-	•	•	•	-
Угол полного внутреннего отражения 24...25°	-	-	•	•	-	-
Край собственного поглощения 220...225 нм	-	-	•	•	•	-
Ширина запрещенной зоны 5,45 эВ	•	•	•	•	-	-
Критическая напряженность электрического поля 10 ⁷ В / см*	•	•	-	•	-	-
Дрейфовая скорость насыщения носителей заряда: электронов 2 · 10 ⁷ см / с; дырок 10 ⁷ см / с	•	-	-	-	-	-
Подвижность носителей заряда: электронов 4 500 см ² / В · с; дырок 2 100 см ² / В · с	•	-	-	-	-	-
Удельное сопротивление при 20 °С 10 ¹³ Ом · см	•	-	-	•	-	-
Относительная диэлектрическая проницаемость 5,5	-	•	•	•	•	-
Химическая стойкость	-	-	-	•	-	•
Радиационная стойкость	•	•	•	•	•	-

* Рекордные значения. Рекордная температура Дебая равна 1860 К – интегральная характеристика материала, определяющая его устойчивость к термическому, энергетическому, радиационному и химическому воздействиям.

по теплопроводности, критической напряженности поля и ширине запрещенной зоны. Последний параметр является одним из определяющих с точки зрения достижения максимально высоких рабочих температур.

Применительно к экстремальному микроприборостроению следует обратить внимание также на рекордно низкий коэффициент расширения алмаза (10^{-6} K^{-1}) и сравнительно невысокое значение относительной диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 5,5$).

Перспективы доминирования алмаза в технических системах с критической миссией были ранее рассмотрены в ряде наших работ и представлены в табл. 2–4, отражающих «рекордные» характеристики алмаза и области их эффективного использования [1–4]. Приоритетными рекордными свойствами алмаза, безусловно, являются механическая твердость, теплопроводность, критическая напряженность электрического поля, скорость распространения звука и как обобщающий фактор,

Таблица 3. Номенклатура продукции нового поколения с достижением экстремальных характеристик при использовании синтетического алмаза

Продукция. Изделия	Направления. Области применения					
	СВЧ-электроника	Силовая электроника	Фотоника	Микросистемная техника	Информационные технологии	Механообработка
Подложки монокристаллические	●	●	●	●	●	-
Гомоэпитаксиальные структуры	●	●	●	●	●	-
Гетероэпитаксиальные структуры	-	-	●	●	-	-
Подложки мозаичные	-	●	-	●	-	-
Теплоотводы	●	●	●	●	-	-
Окна широкополосные	●	-	●	-	-	-
Оптические и рентгеновские компоненты (линзы, зеркала, призмы, фильтры)	●	-	●	●	●	-
Волноводы и капилляры	-	-	●	●	●	-
Транзисторы	●	●	●	-	-	-
Диоды	●	●	●	-	-	-
Автоэмиссионные структуры	●	-	●	●	-	-
Плазменные панели	-	-	●	-	-	-
Фотоприемники	-	-	●	●	●	-
Микромеханика	●	-	●	●	-	-
ПАВ-электроника	●	-	●	●	-	-
Микроинструмент	-	-	-	●	-	●
Электроды	-	-	-	●	-	-
Порошки	-	-	-	-	-	●
Электрохимические компоненты	-	-	-	●	-	-
Поглотители энергии	●	-	●	-	-	-

Таблица 4. Экстремальные характеристики, достигаемые при использовании алмаза

Направление	Экстремальные характеристики
СВЧ-электроника	<ul style="list-style-type: none"> • Производство «мощность-частота» • Прозрачность для электромагнитного излучения в широком частотном диапазоне • Работа при повышенных температуре и радиации
Силовая электроника	<ul style="list-style-type: none"> • Высокие рабочие напряжения и плотности тока • Высокая импульсная коммутируемая мощность • Работа при повышенных температурах и радиации
Фотоника	<ul style="list-style-type: none"> • Чрезвычайно широкий спектральный рабочий диапазон от УФ до рентгеновского излучения • Возможность функциональной интеграции СВЧ- и оптического излучений • Работа при высоких уровнях энергетических воздействий
Микросистемная техника	<ul style="list-style-type: none"> • Повышенные механические характеристики в отношении механической прочности, истираемости, разрушения • Устойчивость к воздействию повышенных температур и локальному энерговыделению • Инертность в химически активных и биологических средах
Информационные технологии	<ul style="list-style-type: none"> • Ранее недостижимые скорости обработки и обмена информацией • Использование УФ и рентгеновских диапазонов частот для обмена информацией • Устойчивость к радиационным воздействиям
Механообработка	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая скорость механообработки • Высокое качество поверхности: шероховатость, нарушенный слой • Возможность сверхлокальной микро- и наноразмерной обработки • Устойчивость микроинструмента к разрушению, истиранию • Неограниченные возможности по виду обрабатываемых материалов

характеризующий «сопротивляемость» материала к внешним воздействиям – высокая температура Дебая.

Как видно из представленных таблиц, данный материал становится научно-индустриальным и конструкторско-технологическим приоритетом, определяющим превосходство в изделиях нового поколения. Вместе с тем необходимо отметить ограничения по организации промышленного производства приборов на основе алмаза:

- отсутствие монокристаллических подложек алмаза больших размеров (20 мм и более);
- высокое удельное сопротивление монокристаллов алмаза (более 10^{13} Ом·см) и отсутствие эффективных способов легирования материала с достижением необходимого уровня концентрации носителей заряда при комнатной температуре из-за значительной энергетической глубины залегания электрически активных примесей;
- достаточно высокий фон (10^{16} см⁻³) неконтролируемых примесей в выращенных монокристаллах синтетического алмаза;
- ярко выраженное секторальное распределение примесей в легированных монокристаллах синтетического алмаза в процессе роста;

- отсутствие структурно-совершенных (с плотностью дислокаций менее 10^3 см⁻²) объемных монокристаллов и эпитаксиальных слоев алмаза.

Комплекс современных технологических ограничений на развитие промышленного микроприборостроения на алмазе отражает табл. 5 [1].

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА

Отечественная научно-технологическая школа алмаза сохраняет определенный международный паритет, а по технологии выращивания крупных структурно-совершенных монокристаллов – превосходство в этой инновационной наукоемкой сфере.

НРНТ-метод выращивания синтетических алмазов

Открытие термодинамических закономерностей существования графитовой и алмазной фазы позволило в 1950-х годах реализовать технологию выращивания алмаза при высоких давлениях и высоких температурах (НРНТ). В 1971 году компания General Electric Research Center разработала модификацию метода НРНТ

Таблица 5. Технологические ограничения для развития промышленного микроприборостроения на алмазе

Характеристики, особенности материала	Ограничения для промышленного использования
Малая площадь монокристаллов подложек	Низкая эффективность использования традиционного оборудования для интегрально-групповой технологии
Низкое структурное совершенство монокристаллов и эпитаксиальных слоев	Ограничение на достижение конкурентоспособных и рекордных параметров приборов
Очень низкое структурное совершенство составных и мозаичных подложек большой площади	Ограничение на использование композиционных подложек для силовой, высокочастотной и информационной электроники
Низкое структурное совершенство гетероэпитаксиальных алмазных структур из-за значительного рассогласования кристаллических решеток	Ограничение на использование гетероструктур для силовой, высокочастотной и информационной электроники
Наличие существенного уровня фоновой примеси – азота	Ограничения на оптические и электрические характеристики базового материала
Низкая эффективность легирующих примесей из-за значительных глубин ее залегания	Требуются высокие уровни легирования для обеспечения необходимой концентрации носителей заряда, что отрицательно сказывается на их подвижности
Наличие фактически единственного эффективного акцептора – бора	Ограниченные возможности по созданию твердотельных приборов с <i>p-n</i> -переходом или проводящим каналом, только <i>p</i> -тип
Сильная температурная зависимость подвижности носителей заряда	Снижение эффективности прогнозируемых возможностей работы приборов при высоких температурах
Отсутствие собственного оксида	Необходимость использования инородных диэлектриков или собственного нелегированного алмаза

с градиентом температуры по объему реакционной камеры. Этим методом стали выращивать желтые (содержащие азот) монокристаллы алмаза хорошего качества весом 1...2 карата (5...6 мм в поперечнике). Еще через 10 лет методом температурного градиента с использованием геттеров азота научились выращивать бесцветные кристаллы весом 7...8 карат (10 мм в поперечнике). Такие кристаллы совершеннее природных. Они прозрачны для электромагнитного излучения с длинами волн больше 225 нм, содержат незначительное количество примесей. В лучших из них мало кристаллических дефектов, они свободны от внутренних напряжений. Алмазы методом температурного градиента выращивают в камерах высокого давления при давлениях около 6 ГПа и температурах 1600...1700 К (рис. 3).

Источник углерода располагается в верхней, самой горячей части реакционной камеры высокого давления над металлом (обычно Fe, Ni или Co), выступающим в качестве растворителя и катализатора. Маленький



Рис. 3. Цех кубических прессов для выращивания монокристаллов алмаза (фотографии представлены ООО «Нью Даймонд Технолоджи»)

затравочный кристаллик (или кристаллики) располагают в нижней, самой холодной, части камеры. Движущая сила кристаллизации возникает из-за разницы растворимостей углерода в металле в условиях градиента температуры. Скорость роста качественного кристалла составляет 6...9 мг/ч, а максимальный размер – 15 мм. В качестве геттера азота используются добавки Ti и Al, образующие с азотом устойчивые соединения.

Кристаллы, выращенные методом температурного градиента, имеют секторальную структуру и часто включения металла-растворителя или карбидов. Сектора различаются кристаллическим совершенством и захватом примесей. Ростовый сектор (001) имеет самую совершенную кристаллическую структуру и низкое содержание примесей. Сектора окаймлены материалом, пронизанным большим количеством дислокаций. Несмотря на большой прогресс технологии HPHT, выращивание монокристаллического алмаза большой площади этим методом затруднено, поскольку требует использования больших реакционных объемов, а значит, огромных аппаратов высокого давления, стоимость и техническая сложность которых резко нарастает с увеличением линейного размера камеры. Однако HPHT-монокристаллы являются лучшими подложками для CVD^{*} эпитаксиального выращивания синтетических алмазов. Поскольку эпитаксиальный материал, как минимум, наследует протяженные структурные дефекты подложки, то для эпитаксии нужно использовать максимально совершенные кристаллические подложки. В настоящее время CVD-алмаз с наиболее совершенной кристаллической структурой может быть получен из (001) ростовых секторов HPHT-кристаллов.

CVD-метод выращивания синтетических алмазов

Открытие термодинамических закономерностей существования графитовой и алмазной фазы позволило в 1950-х годах разработать циклический процесс пиролиза углеводородов и впервые продемонстрировать рост алмаза при низких давлениях. Вначале были синтезированы легированные бором алмазные пленки. В 1953 году был описан синтез содержащих кристаллический алмаз твердых углеродных пленок из ацетилена в электрическом разряде. В 1981–1982 годах осуществлен качественный скачок в технологии CVD-алмаза: смесь водорода и углеводорода, которая активировалась сильно накаливаемой вольфрамовой нитью. Алмазная пленка была выращена на алмазной подложке, расположенной близко от нити. Благодаря наличию атомарного водорода стравливался графит, образующийся одновременно с алмазом. Эта



Рис. 4. CVD-реактор Института прикладной физики РАН

технология позволила отказаться от чередования циклов роста и травления, а также значительно увеличила скорость роста алмаза.

CVD-алмаз синтезируется из газовой смеси водорода (H_2) с углеводородом (обычно CH_4) в области термодинамической стабильности графита. Ключевую роль в росте алмаза играют два радикала: атомарный водород (H) и метил-радикал (CH_3). Для их образования необходимо активировать газовую смесь. Чаще всего CVD-алмаз производится в специальном реакторе (рис. 4) [5]. Главными параметрами, определяющими CVD-процесс синтеза алмаза, являются: давление газовой смеси P , мощность возбуждения газа P_m (определяющая температуру газа T_g), доля углеводорода в газовой смеси и температура подложки T_s . Разновидности CVD-метода определяются разновидностями активации газовой смеси. Наибольшее распространение получили плазменные CVD-методы.

CVD, усиленный плазмой (PECVD)** – CVD-метод, в котором использование плазмы газовой смеси дополнено плазменной активацией поверхности подложки. За счет более высокой эффективной температуры поверхности подложки, данный метод работает при более низких температурах и позволяет получать покрытия, равновесные условия синтеза которых недостижимы иными методами из-за недопустимости перегрева подложек или иных причин. Этим методом выращиваются в частности алмазные окна для оптических систем.

CVD, активированный СВЧ-плазмой (MPCVD)*** – один из наиболее широко используемых методов синтеза алмаза. Магнетрон обычно используется для генерации СВЧ-энергии на частоте 2,45 ГГц, а волноводный узел

* CVD (chemical vapor deposition) – химическое осаждение из газовой фазы.

** PECVD – plasma-enhanced CVD.

*** MPCVD – microwave plasma CVD.

используется для передачи энергии в резонатор. Преимущество MPCVD-метода заключается в отсутствии электродов, и как следствие – в отсутствии загрязнения алмаза электродным материалом.

CVD, усиленный непрямой плазмой (RPECVD)* – в отличие от PECVD, в плазме газового разряда происходит только разложение прекурсоров, в то время как сама подложка не подвергается ее действию. Это позволяет исключить радиационные повреждения подложки и снизить тепловое воздействие на нее. Такой режим обеспечивается за счет пространственного разделения областей разложения и осаждения и может дополняться различными методами локализации плазмы (например, при помощи магнитных полей или повышения давления газа).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТА «МАТЕРИАЛ ЭЛЕКТРОННОГО КАЧЕСТВА»

1. Наш креатив – направления превосходства:

- крупные монокристаллы (подложки) алмаза – мировой имидж;
- технология epi-ready (путь к электронному качеству) – имидж России;
- достижение гетерогенной интеграции широкозонных материалов (структуры, приборы, алмаз, карбид кремния, нитрид галлия) – технологический прорыв;
- уникальные проекты с доминированием алмаза (алмазное микроприборостроение: скальпель, линза) – мировой имидж, деньги, продукция нового поколения.

2. «Микроэлектронные» проекты

(актуальные, востребованные для программ)

Алмаз электронного качества – основа для достижения рекордных характеристик таких микроэлектронных устройств [6], как:

- УФ-детекторы (чувствительность, спектральный диапазон);
- β-вольтаика (эффективность преобразования);
- рентгеновские (корпускулярные) линзы (идеальные);
- диоды с барьером Шоттки (уникальные характеристики);
- NV-центры (компьютеринг; нанонавигация);
- теплоотводы:
 - большая площадь (мощные системы);
 - микропрофилированные (принудительное охлаждение);
 - интегрально-групповые технологии (контакты, коммутация);

- гетерокомпозиции для гетерогенной интеграции широкозонных материалов с алмазным теплоотводом (экстремальные режимы эксплуатации, микроволновые системы).

3. Продукция проекта – алмаз электронного качества

Технологии:

- разращивание («матричная репликация») подложек-затравок;
- получение микротолщинных эпитаксиальных слоев;
- получение легированных монокристаллических подложек алмаза n- и p-типов проводимости;
- получение легированных эпитаксиальных слоев алмаза и изотипных структур;
- получение сильнолегированных нанотолщинных (δ-легированных) слоев алмаза;
- получение чистых структурно-совершенных монокристаллов алмаза с матричной репликацией подложек-затравок, обработка поверхности epi-ready;
- получение гетероэпитаксиальных композиций со скрытыми (буферными) слоями алмаза;
- технология интеграции в гетероэпитаксиальную композицию захороненных скрытых слоев теплоотводящего алмаза (композиции «алмаз-GaN, Si, SiC»);
- технология CVD-ALD композиции «алмаз – оксид галлия».

Оборудование:

- CVD-реактор с плазменной активацией зоны роста большой площади;
- CVD-реактор с газофазными источниками легирования;
- CVD-реактор с импульсным прецизионным легированием;
- CVD-реактор в режиме ALD для композиции «алмаз – оксид галлия».

4. Целевые показатели продукции проекта:

- структурное совершенство;
- легированные подложки (монокристаллы) и эпитаксиальные слои;
- сильнолегированные нанотолщинные (δ-легированные) слои;
- анизотипные алмазные эпитаксиальные структуры;
- сильнолегированные монокристаллы алмаза как материал подложек;
- структурно-совершенные чистые монокристаллы алмаза как материал подложек большой площади;
- гетерокомпозиции на основе широкозонных материалов с захороненными слоями алмаза;
- мультиспектральная (235...270 нм) композиция «алмаз – оксид галлия».

* RPECVD – remote plasma-enhanced CVD.

5. Требования к материалу электронного качества

Следует особо отметить, что основой наукоемкой инновационной научно-индустриальной продукции создаваемого консорциума «Алмазная долина» является материаловедческий базис с совокупностью базовых технологий синтеза и модифицирования алмаза:

- крупные монокристаллы для подложки больших размеров;
- объемные легированные и чистые эпитаксиальные слои;
- дельта-легированные эпитаксиальные структуры;
- алмазные структуры с поверхностно-модифицированными слоями;
- гетероэпитаксиальные структуры алмаза на иной подложке;
- ионно-легированные анизотипные структуры.

Ключевые параметры для нового поколения создаваемых алмазных материалов определены в рамках следующих требований:

- максимальные размеры монокристаллических подложек (>25 мм);
- минимальная плотность дислокаций (10^2 см^{-2});
- минимальный фон неконтролируемых примесей ($<10^{16} \text{ см}^{-3}$);
- диапазон уровней легирования донорами и акцепторами ($10^{16} \dots 10^{21} \text{ см}^{-3}$).

ПРОЕКТ «СОЗДАНИЕ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПО ТЕХНОЛОГИИ И НА УСТАНОВКАХ С ОСНАСТКОЙ СОБСТВЕННОЙ РАЗРАБОТКИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН И ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ»

Проект соответствует Распоряжению Правительства РФ от 17 января 2020 года № 20-р «О Стратегии развития электронной промышленности РФ на период до 2030 года и плане мероприятий по ее реализации» в части:

- технологии синтеза полупроводниковых материалов и эпитаксиальных структур: карбид кремния, монокристаллический алмаз;
- постростовые технологии производства силовой высоковольтной (до 6500 В, 1200 А), высокотемпературной (450 °С) и радиационно-стойкой электроники на основе нитрида галлия, карбида кремния, алмаза;
- технологии производства МЭМС и МОЭМС.

Обобщенная конкретная конечная продукция проекта:

- алмазные пластины с эпитаксиальными слоями для производства изделий и конечных приборов электронной компонентной базы;

- производство 50-мм алмазных структур для использования в полупроводниковой промышленности для формирования GaN-структур;
- производство пластин для оптики и лазерных технологий;
- алмазные монокристаллические и поликристаллические теплоотводящие плоские и микропрофилированные пластины.

Планируемые результаты реализации проекта:

- технология *epi-ready* подготовки поверхности алмазных подложек-субстратов с атомно-слоевым рельефом (1 нм и менее) для обеспечения слоевого роста алмаза с минимальным увеличением плотности дислокаций при матричной репликации субстрата;
- технология «импульсного газофазного легирования» наноразмерных эпитаксиальных слоев алмаза в процессе роста с достижением сильного легирования (до 10^{21} см^{-3}) в толщинах δ -слоев (1,2...2,5 нм);
- технология формирования гетероструктур на основе Si- и SiC-подложек с интеграцией алмазного слоя толщиной десятки-сотни микрон для выполнения функции теплоотводящего субстрата;
- технология микропрофилирования приповерхностных слоев алмаза на подложках большой площади с формированием микроканалов заданной геометрии и топологии (с точностью позиционирования не хуже 3...5 мкм при диаметре канала не менее 10 мкм и аспектном отношении не хуже 1:10) с доминированием интегрально-групповых принципов обработки.

Продукты проекта:

- монокристаллические и поликристаллические подложки алмаза больших размеров (до 50 мм), изготовленные CVD-методом разращивания чистых и легированных монокристаллов *n*- и *p*-типов проводимости;
- эпитаксиальные микротолщинные чистые и легированные слои алмаза, изотипные и анизотипные (*n/p*) композиции;
- микропрофилированные монокристаллические и поликристаллические подложки алмаза большой площади с заданной геометрией и топологией;
- эпитаксиальные структуры с интегрированными нанотолщинными (1,2...2,5 нм) сильнолегированными слоями *n*- и *p*-типов проводимости ($10^{20} \dots 10^{21} \text{ см}^{-3}$) соответственно;
- гетероструктуры на основе Si- и SiC-подложек с интегрированными теплоотводящими CVD-слоями алмаза (толщина от 50 до 250 мкм);

- микропрофилированные монокристаллические и поликристаллические подложки алмаза большой площади с заданной геометрией и топологией (с точностью позиционирования не хуже 3...5 мкм при диаметре канала не менее 10 мкм и аспектном отношении не хуже 1:10).

Особенности продукции проекта:

- пластины алмазные, теплоотводящие, поликристаллические плоские. Особенностью поликристаллических пластин большого размера является увеличение отводимой мощности при увеличении размеров теплоотвода из поликристаллического алмаза;
- пластины алмазные, теплоотводящие, монокристаллические плоские. Особенностью синтетических алмазных монокристаллических пластин является максимально высокое значение теплопроводности (2300–2500 Вт/К·м), необходимое для отвода тепла в малых объемах;
- пластины алмазные теплоотводящие монокристаллические и поликристаллические плоские и микропрофилированные. Особенностью процессов микропрофилирования алмазного теплоотвода является использование прецизионной лазерной, химико-механической и ионно-плазменной обработки поверхности пластин большой площади с достижением шероховатости в канале до 10...50 нм с обеспечением интегрально-групповой технологии процессов.

Технические требования к продукции проекта:

- подложки алмаза:
 - диаметр: до 50 мм;
 - толщина: 0,5...1,5 мм;
 - плотность дислокаций: не хуже 10^4 см^{-2} ;
 - уровень неконтролируемых примесей: не более 10^{16} см^{-3} ;
 - тип легирования: *n*- и *p*-тип;
 - уровень легирования: $10^{16} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$;
- эпитаксиальные структуры *n*- и *p*-типов проводимости, изотипные и анизотипные (*n/p*) композиции:
 - толщина слоев: 0,2...30 мкм;
 - уровень легирования: $10^{17} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$;
- эпитаксиальные структуры с нанотолщинными δ -легированными слоями:
 - толщина: 1,2...2,5 нм;
 - уровень легирования: до 10^{20} см^{-3} (*n*-тип); до 10^{21} см^{-3} (*p*-тип);
- гетероструктуры с интегрированными алмазными теплодиссипирующими слоями-подложками:
 - типы гетероструктур: «кремний – алмаз», «карбид кремния – алмаз»;
 - толщина алмазного слоя: 50...250 мкм;

- микропрофилированные алмазные подложки большой площади с каналами заданной топологии:
 - диаметр: до 50 мм;
 - разрешение: не хуже 3...5 мкм;
 - диаметр канала: не менее 10 мкм;
 - аспектное отношение: не хуже 1:10;
 - шероховатость поверхности в канале: 10...50 нм.

Требования к продукции электронного качества:

- структурно-совершенные чистые и управляемо легированные монокристаллы алмаза больших геометрических размеров электронного качества (мировые тенденции: качество материала, снижение цены при росте качества и геометрических размеров в рамках индустриализации и массовости продукции);
- широкая номенклатура изотипных и анизотипных эпитаксиальных алмазных структур как базиса электронной компонентной базы нового поколения с ранее недостижимыми функциональными параметрами и условиями эксплуатации (расширение промышленных областей применения алмаза и снижение экономических затрат на производство алмазной ЭКБ);
- эпитаксиальные алмазные структуры с интегрированными нанотолщинными сильнолегированными слоями (δ -легированный слой) для транзисторных и диодных структур (базовая структура для ЭКБ микроволновой электроники с предельными характеристиками «мощность – частота»);
- гетерослоевой субстрат с интегрируемым ростовым способом в подложку слоем алмаза для обеспечения экстремального энерготепловыделения (субстраты-подложки нового поколения для ЭКБ микроволновой и силовой электроники с экстремальными режимами и условиями эксплуатации);
- микропрофилированные монокристаллические и поликристаллические подложки алмаза большой площади с заданной топологией микроканалов.

Ключевые технологические процессы для производства продукции проекта:

- разращивание монокристаллических затравок алмаза – синтез газофазным CVD-методом чистых легированных монокристаллов для разделения на отдельные подложки-субстраты;
- получение микротолщинных эпитаксиальных слоев *n*- и *p*-типов проводимости, изотопных и анизотипных эпитаксиальных композиций;
- получение эпитаксиальных нанотолщинных (1,2...2,5 нм) δ -легированных слоев с высоким уровнем легирования примесей (до 10^{21} см^{-3});
- получение гетерокомпозиций «алмаз – кремний», «алмаз – карбид кремния» на основе исходных

Si- и SiC-подложек с алмазными слоями для формирования композиционных теплоотводящих подложек;

- прецизионная лазерная, химико-механическая и ионно-плазменная обработка поверхности пластин большой площади с достижением шероховатости в канале до 10...50 нм с обеспечением интегрально-групповой технологии процессов.

Для обеспечения достижения продукции проекта необходимо реализовать совокупность следующих процессов:

- реализация процесса разрачивания подложек и затравок алмаза в течение продолжительного процесса (сутки, недели) для достижения требуемых толщин (3...10 мм) с использованием легирующих добавок из газовой фазы;
- разработка мультикристалльного контейнера субстратов для разрачивания монокристаллов алмаза при проведении комплекса операций по удалению графита и резки монокристаллов на пластины;
- реализация процессов эпитаксиального наращивания чистых и легированных слоев алмаза *n*- и *p*-типов проводимости и анизотипных эпитаксиальных структур (10...15 мкм) с продолжительностью процесса 10...100 ч;
- реализация процессов получения сильнолегированных (10^{20} см⁻³ – *n*-тип, 10^{21} см⁻³ – *p*-тип) нанотолщинных (1,2...2,5 нм) δ -слоев;
- реализация процессов получения гетерокомпозиций «кремний – алмаз» и «кремний – карбид кремния» с дальнейшей модифицирующей обработкой для формирования теплоотводящих подложек для ЭКБ на нитриде галлия и карбиде кремния;
- реализация процессов микропрофилирования алмазного теплоотвода с использованием прецизионной лазерной, химико-механической и ионно-плазменной обработки поверхности пластин большой площади с достижением шероховатости в канале до 10...50 нм с обеспечением интегрально-групповой технологии процессов.

АЛМАЗНЫЕ ПРОЕКТЫ

Алмазный проект – теплоотводы

Введенные глобальные ограничения на поставку в Россию ключевой электронной компонентной базы информационной, сверхвысокочастотной и силовой электроники, а также санкции и запреты на доступ к зарубежным технологиям, оборудованию и материалам могут критически сказаться на создании отечественной продукции военного, специального и гражданского назначения, определяющей безопасность и технологический суверенитет государства.

Особое место в архитектурных композициях, гетерогенно-интегрированных электронных функциональных модулей занимает теплоотводящий компонент, определяющий тепловой «комфорт» прибора. Устанавливается необходимый для обеспечения функциональных характеристик изделия тепловой баланс между генерируемым в процессе работы теплом и его диссипацией – отдачей, определяющей температуру активной зоны преобразующего элемента. Таким образом, материал теплоотвода и его архитектурная компоновка в изделии совместно с преобразующим элементом во многом определяют функциональные характеристики изделия в отношении мощностных, импульсных, частотных параметров и условий эксплуатации.

Данный материал становится научно-индустриальным и конструкторско-технологическим приоритетом, определяющим превосходство в изделиях нового поколения.

Отечественный потенциал алмазной индустрии находится на высоком уровне, и представленный далее сравнительный анализ использования синтетического алмаза при решении востребованной, но достаточно простой задачи создания алмазных теплоотводов указывает на наличие в России уникальных компетенций, которые могут быть использованы в рамках опережающего импортозамещения на рынке ЭКБ для экстремальных режимов и условий эксплуатации.

Функциональные назначения и конструкторско-технологические решения современных теплоотводов нами подробно были изложены в работах [3, 4], однако, учитывая значимость данного вопроса, сформулированы положения, определяющие их значимость:

- обеспечение перспективной ЭКБ с экстремальным энерговыделением системами диссипации тепла и стабилизации температурных режимов работы на основе современных композиций материалов и процессов сборки с минимизацией массогабаритных показателей;
- обеспечение надежности и долговечности аппаратуры с экстремальными режимами и условиями эксплуатации с минимизацией процессов деградации и нестабильности функциональных параметров;
- создание гибридных теплоотводящих конструкций нового поколения, сочетающих теплодиссипирующие, термоэлектропреобразующие и сенсорно-информационные свойства.

Среди конструктивно-технологических факторов, на которые способен непосредственно влиять теплоотвод, выделим следующие:

- миниатюризация, то есть повышение плотности тепловыделяющих элементов в сборке, использование бескорпусной элементной базы и уменьшение массогабаритных показателей;

- генерация, коммутация, преобразование большей мощности, то есть расширение диапазона достигаемых выходных параметров за счет повышения эффективности теплоотдачи;
- стабилизация функциональных параметров, минимизацию тепловых шумов за счет снижения температур работы устройства;
- достижение высоких температур эксплуатации за счет повышения эффективности теплоотдачи от рабочей зоны компонентов;
- механическая устойчивость конструкции за счет использования материалов с низкими коэффициентами линейного расширения;
- радиационная устойчивость конструкций за счет сочетания теплоотводящих, электроизоляционных и механических свойств конструктивных материалов;
- обеспечение электрической стабильности и низких диэлектрических потерь теплоотводящей среды за счет использования материалов с уникальными электрофизическими свойствами.

Комплекс тепловых и сопутствующих им контролируемых и исполнительных процессов и эффектов, используемых в современных теплоотводах (табл. 6) [3], включает:

- рассеяние – диссипацию тепла (газ, жидкость, металл);
- конструктивное обеспечение однородности теплового поля – «выравнивание» температуры;
- тепловую и конструктивную компенсацию термомеханических напряжений;
- тепловую генерацию электрических токов (эффект Зеебека);
- термоохлаждение электрическим током (эффект Пельтье);
- сенсорику температурного поля.

Важным аспектом применительно к теплоотводам, в структуру которых могут быть интегрированы сервисные (например, сенсорные и управляющие температурными режимами) устройства, является легирование алмазных пластин. Если алмазные пластины высокой степени химической чистоты и совершенства кристаллографической структуры представлены в продукции всех ведущих производителей, то легированные алмазные пластины (включая как легирование всей пластины, так и отдельных ее областей) предлагают менее половины компаний. Недостижение этим показателем медианного уровня и отсутствие предлагаемых коммерческих решений характеризуют рынок как ненасыщенный и имеющий разрыв между потенциальным спросом и возможностью адекватного предложения.

Для эффективного развития и обеспечения эффективной конкуренции алмазных и алмазных композитных теплоотводов с альтернативными решениями

Таблица 6. Традиционные и перспективные виды теплоотводящих конструкций

Виды теплоотводящих конструкций	Технические решения
Пассивные	Плоские (2D); профилированные (2,5D, 3D); металлизированные; графитизированные
Теплоактивные	Принудительно теплодиссипирующие: <ul style="list-style-type: none"> • встроенное электронное термоохлаждение; • микрофлюидное охлаждение
Термоадаптивные	Термомеханоактивируемые
Функционально адаптивные	Термомеханорекуперирющие; теплоэнергопередающие; теплоэлектроаккумулирующие
Интеллектуальные	Сенсорные; инфокоммуникационные; процессорно-управляемые

критичны геометрические размеры и толщина производимых алмазных пластин. Существующая в настоящее время типология алмазных и алмазных композитных теплоотводов может быть представлена следующим образом:

- 1D алмазные пленочные покрытия теплоотводов;
- 2D-теплоотводы-пластины и/или подложки;
- 2,5D микроканальные теплоотводы;
- 3D-теплоотводы.

Освоенные геометрические параметры производимых алмазных пластин характеризуют в большей степени существующий уровень требований рынка электронной продукции.

Необходимы алмазные теплоотводы большой площади, но относительно дешевые и, безусловно, не монокристаллические, поскольку необходимы высокие скорости роста, поэтому это поликристаллы размером до 100 мм, исходя из возможного диаметра субстрата, на который будет осуществляться осаждение алмазного материала. Субстрат должен быть инородным и лучше всего для этого подходят подложки кремния диаметром до 100 мм, поскольку тяжело обеспечить однородность осаждения и скорость осаждения даже на таких площадях.

Выбор в качестве субстрата кремния, а возможно, и карбида кремния, – это наша хитрость на будущее,

поскольку такая гетероэпитаксия интересна при создании композиций «алмаз – инородная подложка», где инородная подложка в дальнейшем будет использоваться как базовый материал (например, для осаждения нитрида галлия), а наращенный толстый алмазный слой будет выполнять функции теплоотводящей подложки.

Целесообразно, исходя из развития мощных теплоотводов большой площади с искусственным жидкостным охлаждением, взяться за вопросы микропрофилеирования алмазных подложек по заданному топологическому закону, причем в рамках интегрально-групповой технологии, то есть не через использование лазерного микропрофилеирования, а через использование классических вариантов микротехнологий, основанных на травлении через маскирующие покрытия. Кроме нас, это никто не сделает, учитывая наши наработки по травлению алмазных материалов жидкостными и сухими методами.

Безусловно, большая площадь теплоотвода потребует формирования систем коммутации для того, чтобы разместить на коммутационных площадках активные тепловыделяющие компоненты. В данном случае гармонично сочетаются опять интегрально-групповые технологии, но уже с элементами металлизации. Алмазные теплоотводы большого размера со сложной системой коммутации или для последующего разделения теплоотводов больших размеров на микротеплоотводящие платы с системой коммутации в виде контактных площадок чрезвычайно востребованы.

КРЕАТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ АЛМАЗНОГО МИКРОПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Проект «Алмазный интеллектуальный скальпель»

Цель проекта:

интеллектуальный микрохирургический алмазный инструмент для прецизионного препарирования биообъектов с минимальным посттравматическим воздействием на основе гетерогенной интеграции на алмазном лезвии скальпеля систем термокоагуляции, ультрафиолетовой фотонной стерилизации, видеорегистрации и оптической спектральной диагностики.

Задачи проекта:

- разработка микрохирургического инструмента нового поколения на основе гетерогенной интеграции на алмазном лезвии микросистем, обеспечивающих коагулирующие, стерилизующие и сенсорные функции;
- интеграция в конструкцию креативной разработки совокупности инновационных конструкторско-технологических решений, обеспечивающих создание микрохирургического инструмента на

алмазном лезвии с микросистемами для контролируемой коагуляции тканей, ультрафиолетовой подсветки и стерилизации оперативной зоны и ее видео- и оптико-спектрального контроля;

- формирование и ввод в эксплуатацию пилотной технологической линии контрактного производства микрохирургического инструмента нового поколения на основе алмазной рабочей части с совокупностью специализированных микросистем для термокоагуляции, стерилизации и видеоспектрального контроля оперативной зоны.

Детализируя новизну технических решений, выделим:

- размещение на поверхности сменного алмазного лезвия планарной секционной теплофизической микросистемы, интегрирующей резистивные микронагреватели и датчики температуры, выполняющей функции управляемой термокоагуляции;
- размещение в ручке скальпеля ультрафиолетового микроизлучателя, интегрированного оптическим каналом с алмазным лезвием с функциями фотонной стерилизации и подсветки оперативной зоны;
- размещение в ручке скальпеля на выходе от интегрированного с лезвием оптического канала фотоприемной матрицы для обеспечения видеорегистрации и оптической специальной диагностики;
- алмазные сменные лезвия микрохирургического алмазного инструмента различной конфигурации и размеров со специальной системой заточки и позиционирования коагулирующих, стерилизующих и оптовидеосенсорных микросистем;
- миниатюрный блок микрохирургического алмазного инструмента, включающий энергообеспечивающий, процессорный, информационно-сенсорный модули, блок радиоканала и систему отображения информации.

Новизна технических и технологических решений

Впервые в отечественной практике предлагается реализовать проект по созданию и организации промышленного контрактного производства микрохирургического инструмента нового поколения с алмазными лезвиями, интегрирующими совокупность нетрадиционных функций, включая термоконтролируемую коагуляцию тканей, УФ-стерилизацию оперативной зоны, ее подсветку, видеорегистрацию и оптико-спектральный контроль. Особенностью хирургического микроинструмента являются характеристики алмазного лезвия: заточка до десятков нанометров; произвольная геометрия, варьируемая в диапазоне от сотен микрометров до 10...15 мм; наличие на поверхности интегрированных микронагревателей и сенсоров температуры, при обеспечении сменного лезвия функциями стерилизации в химически агрессивной среде.

Новизна технических решений:

- алмазное сменное лезвие со специальной системой наноразмерной заточки при сохранении длительного срока эксплуатации при химической обработке;
- планарная секционная теплофизическая микросистема, размещенная на лезвии для контролируемой термокоагуляции, включающая резистивные микронагреватели и датчики температуры;
- интегрированная оптоэлектронная система, включающая алмазное лезвие, через которое обеспечивается подсветка, УФ-облучение и видеонаблюдение зоны реза, а также оптико-спектральный контроль;
- миниатюрная спектральная фотоприемная матрица размещается вместе с УФ-излучателем и широкополосным светодиодом в ручке скальпеля и соединяется с алмазным лезвием оптическим волноводным каналом;
- сенсорно-информационный процессорный и энергообеспечивающий модуль имеет радиоканал с сетевой средой и портативным гаджетом типа смартфона.

Новизна технологических и программных решений:

- программно-алгоритмические средства для управления подсистемами термокоагуляции, стерилизации, оптической подсветки, видеонаблюдения и регистрации, оптико-спектрального анализа и системой в целом, включая сервисные функции;
- технология печатной электроники для формирования гибкой системы коммутации электронных систем;
- технология волоконной оптики для интеграции модулей регистрации с алмазным мультифункциональным лезвием.

Новизна выбранных способов (правовая охрана)

Базовые конструктивные решения, связанные с формированием планарной секционной теплофизической микросистемы, размещенной на лезвии, включающей резистивный микронагреватель и датчики температуры, а также оснащение электрохирургического скальпеля системой УФ-стерилизации через лезвие принадлежат одному из авторов данной статьи и проекта и были защищены патентом (рис. 5) [7].

На зарубежном рынке предлагаются алмазные скальпели без

дополнительных сервисных функций, наиболее близким аналогом к предлагаемому интеллектуальному алмазному скальпелю является микрохирургический инструмент фирмы C2Dx Inc (США) [8], использующий систему термокоагуляции, но на алмазном лезвии УФ-облучение, стерилизация, подсветка, оптико-спектральная диагностика в американском аналоге отсутствуют.

Научно-технический задел по тематике проекта

Имеется научно-технический задел по совокупности конструкторско-технологических решений, используемых в проекте базовых технологических операций и аппаратной базы для реализации, включая:

- технологию роста и обработки алмазных пластин, способов их обработки и формообразования;
- технологию формирования планарных элементов терморезистивных нагревательных и сенсорных элементов термокоагулирующих микросистем;
- технологию печатной электроники для коммутации функциональных модулей интегрированной системы для алмазного скальпеля; технологию сборки оптоэлектронных компонентов оптического канала алмазного скальпеля.

Создан прототип системы, проведено ее испытание в моделирующей биологической среде.

Имеются технологические карты производства пластин алмаза с нанометровой шероховатостью поверхности из монокристаллического алмаза, обработки поверхности пластин для формирования заданной геометрии лезвия и среза с нанометровой точностью.

Создана эскизная конструкторско-технологическая документация на сенсорно-информационный модуль.

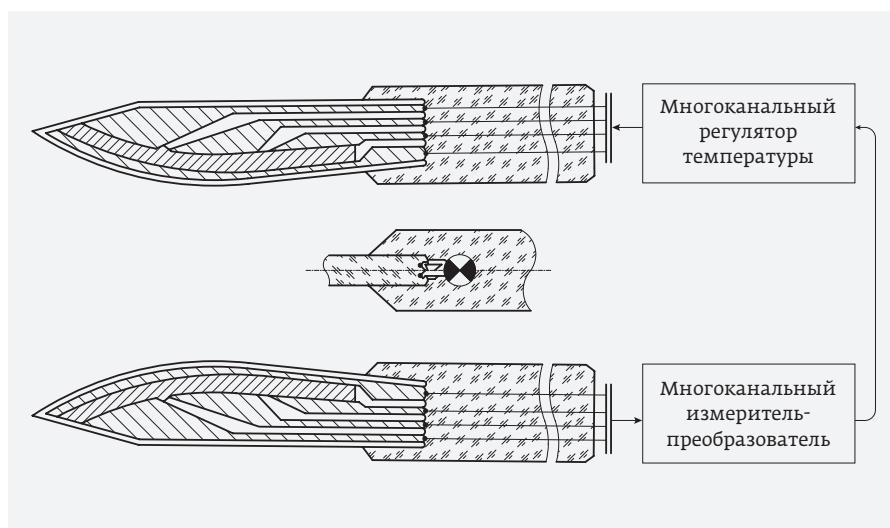


Рис. 5. Электрохирургический скальпель

Окончательные технические требования к продукции проекта:

- базовая продукция: мультифункциональный интеллектуальный алмазный скальпель;
- материал лезвия: алмаз;
- геометрические размеры (типовые): 10 × 5 × 0,5 мм;
- форма: 2D / 3D (по требованию заказчика);
- острие (заточка) лезвия: 50...100 нм;
- скорость резания: 1...5 мм/с;
- потребляемая мощность: не более 15 Вт;
- стерилизующая УФ-подсветка: спектральный максимум 0,34 мкм;
- подсветка видимым излучением: спектральный максимум 0,55 мкм;
- оптико-спектральная диагностика: спектральный диапазон 0,35...1,0 мкм.

Назначение продукции проекта

Продукция предназначена для организаций государственной и частной медицины с ориентацией на использование алмазного микроинструмента в стационарной, оперативной, полевой, эстетической хирургии и офтальмохирургии.

На российском и зарубежном рынках аналогичная продукция отсутствует. Продукция реализуется в рамках импортонезависимого производства, обладает превосходством перед зарубежными аналогами по функциональным возможностям с обеспечением экспортного потенциала.

Базовая номенклатура продукции проекта:

- микрохирургический инструмент: скальпель с алмазной режущей кромкой;
- материал сменного лезвия: алмаз.

Функциональные характеристики:

- термокоагуляция (40...150 °С);
- УФ-стерилизация (0,34 мкм);
- оптическая подсветка (0,3...0,8 мкм);
- видеорегистрация оперативной зоны;
- оптикоспектральный контроль оперативной зоны (0,5...1,0 мкм);
- радиоканал (1 ГГц).

Актуальность проекта

Решаемые проблемы:

- организация в РФ контрактного производства интеллектуального микрохирургического инструмента для прецизионного препарирования биообъектов с минимальным посттравматическим воздействием с гетерогенной интеграцией на алмазном лезвии микросистем для контролируемой термокоагуляции, стерилизации, оптической подсветки и видеорегистрации, оптической спектральной диагностики;

- на российском рынке производство данной медицинской продукции нового поколения с элементами интеллектуализации, цифрового управления, возможности передачи информации по радиоканалу с обеспечением ранее указанных новых функциональных возможностей в отношении УФ-стерилизации, подсветки, видеорегистрации и оптикоспектрального контроля оперативной зоны отсутствует;
- в России имеет место производство на заказ отдельных образцов скальпелей с алмазным лезвием без дополнительных функциональных возможностей по термокоагуляции, стерилизации и сенсорике, а также используются лазерные и высокочастотные электроскальпели;
- разработка и организация инновационного контрактного производства широкой номенклатуры микрохирургического алмазного инструмента нового поколения, обладающего безусловными преимуществами новизны и превосходства перед зарубежными аналогами обеспечат импортонезависимость востребованной интеллектуальной продукции со значительным экспортным потенциалом;
- на данном этапе по уровню работ «исследования и разработки» Россия находится на уровне зарубежного научно-инженерного сообщества в области создания алмазных лезвий и превосходит зарубежные аналоги по системности разработок в области расширения функциональных возможностей по микрохирургическому инструменту на основе алмаза;
- предлагаемый к созданию индустриальный комплекс контрактного производства микрохирургического алмазного инструмента будет основан на исключительно отечественных технологиях.

Проект «Алмазная интеллектуальная линза»

Интеллектуальная мультифункциональная оптическая линза с эффектом дополненной реальности, расширенным спектральным диапазоном наблюдения и диагностикой слезной жидкости – биоинформационный интерфейс нового поколения «смарт-линза» (рис. 6).

Цель проекта: создание гармонизированного с человеком биозамещающего интерфейса – эпиимпантируемой неинвазивной бионической мультифункциональной интерактивной системы – «смарт-линзы» на основе гетерогенной интеграции на искусственном биоинформационном субстрате совокупности миниатюрных сверхтонких чип-устройств формирования изображения и отображения информации, медико-биологического мониторинга и автономного энергообеспечения, модули инфосетевой и нейроморфной интеллектуальной электроники.

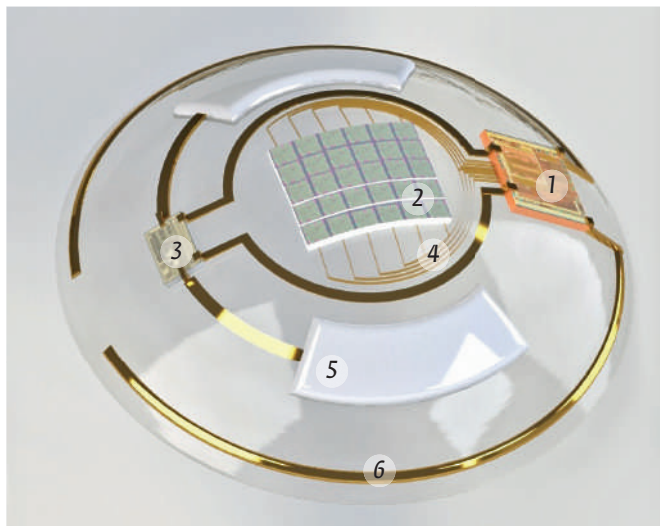


Рис. 6. Биоинформационный интерфейс нового поколения «смарт линза»: 1 – микроконтроллер; 2 – монитор; 3 – RF-трансивер; 4 – коммутация; 5 – источник питания; 6 – антенна

Эпиинтегрируемая в глаз искусственная гибридная конформная мультифункциональная интерактивная миниатюрная система должна выполнять функцию биоинформационного интерфейса при решении следующих задач:

- расширение функциональных возможностей человека и появление эффективности общения с техникой (расширение спектрального диапазона наблюдения и кратности увеличения изображения, реализации режимов виртуальной и дополненной реальности);
- непрерывный неинвазивный медико-биологический мониторинг с возможностью оперативной фармакологической коррекции (контроль внутриглазного

давления, измерение уровня сахара, контроль и ин- активация вирусов, коррекция зрения и доставка лекарственных препаратов).

Эпиимплантируемый неинвазивный бионический ин- теллектуальный оптоэлектронный конформный чип – смарт-линза реализуется на основе синтетического мо- нокристаллического алмаза как наилучшего материала по системному обеспечению оптических, теплофизиче- ских, электрофизических и механических параметров, со- четающихся с идеальной биосовместимостью.

При реализации смарт-линзы используется гетеро- генная интеграция на алмазном субстрате совокупности мультифункциональных чипов, объединенных электриче- скими и оптическими микросистемами коммутации.

Техническая реализация новой, не представленной на рынке в настоящее время, инновационной продукции – наукоемкой интеллектуальной бионической системы – определяет необходимость технологического обеспе- чения разработки в рамках совокупности «по существу» креативных технологий:

- формирование биоконформной прозрачной линзы на основе монокристаллического алмаза, наилучшего материала с точки зрения сочетания физических параметров при идеальной биосовме- стимости с биосредой (табл. 7);
- формирование коммутационного поля, микроан- тенн, электродов, микроаккумуляторов и сенсоров методами гибкой 2D-печатной технологии с исполь- зованием широкой гаммы функциональных мате- риалов и их многослоевых композиций;
- микросборки конформных гетерогенно-интегриро- ванных систем на искусственном не плоском суб- страте с использованием утоненных чип-компонен- тов и метода каплеструйной печати;
- разработка оптически прозрачного интегрируемо- го на поверхность линзы миниэкрана отображения

Таблица 7. Преимущества монокристаллического алмаза для реализации проекта «Интеллектуальная линза»

Приоритетные свойства	Преимущества для проекта
Твердость	Механическая прочность, устойчивость к истираемости и разрушению
Теплопроводность	Рассеивание тепла, работа при повышенных температурах и в условиях локального энерговыделения
Электрофизические характеристики	Высокое удельное сопротивление в широком частотном диапазоне, малые диэлектрические потери
Электромагнитная прозрачность	Прозрачность для электромагнитного излучения в оптическом и СВЧ-диапазонах
Химическая стойкость и биосовместимость	Инертность в химически активных и биологических средах



Рис. 7. Потенциал доминирования синтетических алмазов в решении экстремальных инженерно-технических задач

информации с цифровой системой регистрации изображения на сверхтонкой фотоэлектронной матрице, обеспечивающей наблюдение объектов в расширенном спектральном диапазоне (от УФ до короткого ИК) с целью увеличения функциональных возможностей человека в отношении доступного оптического диапазона видеонаблюдения и проецирования виртуальной информации и объектов на реальное окружение;

- использование в качестве интеллектуальной процессорной среды специализированного мемристового нейрочипа с многоуровневой логикой как базиса интеллектуальной нейроморфной среды с минимальным энергопотреблением, экстремальным быстродействием, киберустойчивостью и способностью к самообучению – процессорной самоадаптации к индивидуальной функциональной среде.

Фактически проект направлен на достижение в рамках креативных инновационных конструкторско-технологических решений создания бионических систем, интегрирующих мультимодальные функциональные возможности интеллектуального биоинтерфейса нового поколения, ориентированного на наиболее востребованный человеком оптический многофункциональный канал.

* * *

«Индустриальное» время технологий синтетического алмаза для решения экстремальных инженерно-технических задач (рис. 7) настало, и ряд из них, без данного материала, эффективно и конкурентоспособно не может быть решен.

Алмазная продукция, исходя из широких базовых функциональных возможностей материала, создает

предпосылки к альтернативному с элементами превосходства выполнению программы импортозамещения и импортонезависимости (табл. 8), предопределяя высокий экспортный потенциал отечественной продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лучинин В. В., Колядин А. В., Машинский К. А.** Алмазная индустрия – российский инновационный вызов // Инновации. 2020. № 4 (258). С. 3–9.
2. **Лучинин В. В.** Национальные технические приоритеты: алмазная экстремальная электроника // Нанотехнологии. 2018. Том 11. № 2. С. 156–169.
3. **Колядин А., Лучинин В., Ягудаев Ю., Бохов О., Ильин С., Клепиков И., Ножкина А.** Потенциал отечественного алмаза. Теплоотводы // ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология, Бизнес. 2022. № 5 (00216). С. 1–12.
4. **Лучинин В. В., Бохов О. С., Ильин С. Ю.** Инновационный потенциал развития алмазных теплоотводов // Инновации. 2022. № 10(276). С. 3–8.
5. Официальный сайт института прикладной физики РАН – URL: <https://ipfran.ru/institute/structure/173893774/results/> (дата обращения 15.04.2023).
6. **Вихарев А. Л., Лучинин В. В.** CVD-алмаз – материал для нового поколения электронных приборов. Выращивание, характеристики и некоторые применения // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2015. Т. 1. С. 29–33.
7. Патент РФ RU (II) 21544351(13) С1 «Электрохирургический скальпель». Заявитель – ООО «Центр технологий микроэлектроники».
8. Официальный сайт компании «С2Dx». URL: <https://c2dx.co/products/hemostatix/> (дата обращения 15.04.2023).

Таблица 8. Проект программы «Российская алмазная индустрия»

Направления Названия проектов	Превосходство, экстремальные характеристики
1. Производство материалов	
1.1. Выращивание структурно-совершенных чистых монокристаллов больших размеров	Монокристаллы размером более 25 мм, плотность дислокации менее 10^3 см^{-2}
1.2. Выращивание легированных монокристаллов больших размеров	Легирование донорами и акцепторами: диапазон 10^{16} – 10^{21} см^{-3} . Неконтролируемые примеси менее 10^{16} см^{-3}
1.3. Разращивание монокристаллов подложек методом CVD	Структурно-совершенные монокристаллы, плотность дислокаций менее 10^3 см^{-2}
1.4. Гомоэпитаксиальный рост толстых эпитаксиальных слоев методом CVD	Легированные <i>n</i> - и <i>p</i> -типа слои (10^{16} – 10^{21} см^{-3}). Толщина более 10 мкм
1.5. Гомоэпитаксиальный рост дельта-легированных нанослоевых эпитаксиальных композиций методом CVD	Толщина 1–5 нм, δ -легирование до 10^{21} см^{-3}
1.6. Гетероэпитаксиальный рост алмаза на инородных подложках методом CVD	Композиции алмаз/SiC, GaN, Me
1.7. Получение алмазных конструкционных материалов большой площади	Пластины диаметром до 200 мм
1.8. Процессы получения ионно-легированных анизотипных структур	Имплантированные слои <i>n</i> - и <i>p</i> -типов с концентрацией примеси $> 10^{20} \text{ см}^{-3}$
1.9. Процессы получения гидрогенизированных слоев на поверхности алмаза	Композиции H/алмаз
1.10. Ионно-плазменное травление и формообразование алмаза	Скорость травления более 1 мкм/мин. Локальность менее 1 мкм
1.11. Лазерная резка и формообразование алмаза	Скорость резки более 10 мкм/мин. Шероховатость $< 10 \text{ нм}$
1.12. Корпускулярно-волновая модификация алмаза	Конструкционно управляемое дефектообразование, энергия более 1 МэВ
1.13. Процессы механохимической обработки поверхности алмаза	Достижение атомарной поверхности epi-ready
2. Электронная компонентная база (ЭКБ)	
2.1. Ультравысокочастотная ЭКБ для инфокоммуникационных систем	Произведение «мощность – частота»
2.2. Сверхмощная силовая электроника	Произведение «ток – напряжение»
2.3. Квантово-волновая ЭКБ для сверхскоростных инфотелепортирующих систем	Скорость обмена, объем информации
2.4. Микроэлектромеханические силовые реле	Надежность, радиационная и ЭМИ-стойкость
2.5. Микрооптомеханические сканеры, зеркала	Диссипация тепла, стабильность геометрических параметров
2.6. Автоэмиссионные ультравысокочастотные высоковольтные коммутаторы	Сверхвысокие частоты и напряжения
2.7. Акустоэлектронная экстремальная ЭКБ	Скорость распространения акустической волны

Направления Названия проектов	Превосходство, экстремальные характеристики
2.8. Алмазные лазеры на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния света	Высокий КПД преобразования. Чувствительность, спектральный диапазон, стойкость к радиации
2.9. NV-нанонавигация	Сверхминиатюрность, точность
2.10. Датчики жесткого УФ-излучения	Чувствительность, спектральный диапазон, стойкость к радиации
2.11. Датчики потока высокоэнергетических корпускулярных частиц	Чувствительность, спектральный диапазон, стойкость к радиации
2.12. Корпускулярные электрические преобразователи – источники энергии	Источники энергии со сверхдлительным сроком функционирования. Экстремальные условия эксплуатации
2.13. Высокотемпературные датчики давления и температуры	Источники энергии со сверхдлительным сроком функционирования. Экстремальные условия эксплуатации
2.14. Радиационно-стойкие датчики давления и температуры	Экстремальная радиационная стойкость
3. Конструкционные компоненты	
3.1. Пассивные алмазные теплоотводы	Рекордная диссипация тепла
3.2. Интеллектуальные алмазные теплоотводы	Гибридные теплоотводы с сенсорно- актюаторными элементами
3.3. Поглотители СВЧ-излучения	Мощные сверхскоростные теплоотводы
3.4. Высоковольтные изолирующие установочные компоненты	Экстремальная электрическая стойкость
3.5. Высокопрочные механические установочные компоненты	Экстремальная механическая прочность
3.6. Алмазные окна оптического диапазона	Прозрачность в широком спектральном диапазоне, теплостойкость
3.7. Алмазные окна микроволнового и терагерцового диапазонов	Прозрачность в широком спектральном диапазоне, теплостойкость
3.8. Алмазная линза – биотехнический интерфейс	Бионические эпиимпланты
3.9. Рентгеновские линзы	Идеальный рентгеновский контраст
3.10. Многослойные рентгеновские зеркала	Многослойные композиции для управле- ния жестким рентгеновским излучением
4. Абразивный инструмент и покрытия	
4.1. Алмазный микроинструмент	Прецизионность, механическая стойкость
4.2. Алмазные покрытия для инструмента	Сверхстойкость к истираемости
4.3. Алмазный режущий инструмент для геологоразведки	Инструмент с длительным сроком эксплуатации в экстремальных условиях
4.4. Алмазные комбинированные защитные покрытия	Механо- и термостойкие покрытия
4.5. Алмазные порошки	Композиции для механообработки, изолирующих и термомеханостойких конструкций